

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

О.О. Петков

**РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ ЗАХИСНИХ РЕЗИСТОРІВ
ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ**

Навчально-методичний посібник
з курсу "Розробка електрофізичних установок для випробувань
та досліджень"
для студентів електротехнічних і електроенергетичних
спеціальностей

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 02.04.2009 р.

Харків НТУ "ХПІ" 2009

ББК 31.24

П 23

УДК 621.3

Рецензенти:

А.В. Ісакова, к-т техн. наук, доцент, НТУ "ХПІ";

Ю.М. Полуктов, д-р техн. наук, пров. наук. співр., ІТФ ХФТІ;

Петков О.О.

П 23 Розрахунок і проектування захисних резисторів ємнісних накопичувачів енергії : навч.-метод. посібник / О.О. Петков. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2009. – 67 с.

ISBN

Викладено теоретичні основи та надано практичні рекомендації для проведення розрахунків і проектування захисних резисторів ємнісних накопичувачів енергії. Наведено приклади розрахунку дротяних резисторів і блоків з резисторів ТВО.

Призначено для студентів електротехнічних і електроенергетичних спеціальностей.

Іл. 30. Табл. 10. Бібліогр. 14 назв.

ББК 31.24

ISBN

© О.О. Петков, 2009

Вступ

Конденсаторні батареї високовольтних ємнісних накопичувачів енергії (СНЕ), які використовуються в різних електрофізичних і випробувальних установках з великою накопичуваною енергією, можуть містити сотні й навіть тисячі конденсаторів. Це пов'язане з тим, що високовольтні конденсатори, які випускаються серійно промисловістю й дрібносерійно спеціальними підрозділами дослідницьких і проектних організацій, мають обмежений ряд значень ємності. Щоб накопичити велику енергію, конденсатори з'єднуються паралельно (рідше – послідовно-паралельно). Для такого з'єднання при пробіі одного з них відбувається розряд усіх інших конденсаторів батареї на пробитий конденсатор, який у цьому випадку являє собою в першому наближенні низькоомний активний опір. Цей процес може призвести до деформації, розгерметизації, вибуху та загоряння пробитого конденсатора. Найбільш ймовірним і небезпечним, з погляду наслідків, є пробій конденсатора на стадії заряду СНЕ [1]. Щоб виключити ці негативні наслідки, застосовують захист конденсаторів, що функціонує у випадку пробою одного з них. Мета захисту – обмежити енергію, що виділяється в пробитому конденсаторі. Проектування системи захисту здійснюється, як правило, у два етапи.

На першому етапі всі конденсатори розбивають на модулі, які містять таку кількість конденсаторів, що при пробіі одного з них і розряді на пробитий конденсатор інших конденсаторів модуля не відбувається руйнування пробитого конденсатора.

На другому етапі обмежують можливість розряду справних модулів на аварійний, що містить пробитий конденсатор. Залежно від

накопичуваної енергії, зарядної напруги ЄНЕ, а також конструктивних особливостей його виконання можливі різні способи обмеження розряду справних модулів на аварійний модуль. Одним з найбільш простих способів є застосування захисних розділових резисторів.

У цьому посібнику розглянуті дві основні схеми захисту конденсаторів ЄНЕ із застосуванням резисторів.

Матеріали посібника призначені для вивчення теоретичних основ, виконання контрольних робіт, курсового та дипломного проектування.

Для зручності користувачів посібник містить короткий термінологічний словник, наведений у додатку Д.1. Словник містить основні терміни, які використовуються при викладенні матеріалів посібника.

Проектування захисних резисторів пов'язано із проведенням різноманітних розрахунків, які зручно проводити з використанням програмного продукту Excel. У додатку Д.2 розглянуто основні прийоми обчислень, які використовуються у практиці розрахунків захисних резисторів.

Автор висловлює щире подяку співробітникам науково-дослідного й проектно-конструкторського інституту "Молнія" НТУ "ХПІ" О.Г. Понуждаєвій та О.С. Недзельському за допомогу в підготовці матеріалів посібника.

1. Основні схеми захисту конденсаторів ємнісних накопичувачів енергії на стадії заряду з використанням захисних резисторів

1.1. Схема захисту конденсаторів з резистором, включеним у коло розряду ЄНЕ на навантаження

Для захисту конденсаторів за допомогою резисторів використовуються різні схемні рішення. На рис. 1.1 показана схема захисту конденсаторів з резистором, включеним у коло розряду ЄНЕ на навантаження.

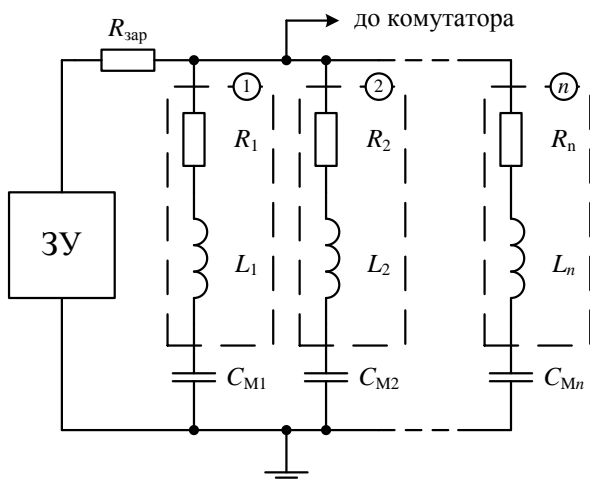


Рисунок 1.1 – Схема захисту конденсаторів з резистором, включеним у коло розряду ЄНЕ на навантаження

Заряд конденсаторної батареї, що складається з n модулів з ємностями C_{M1} , C_{M2} , ... C_{Mn} , здійснюється від зарядного пристрою ЗУ через зарядний резистор $R_{зар}$. Кожен модуль заряджається через захисний резистор, позначений на схемі рис. 1.1 пунктирною лінією. На схемі кожен резистор подано послідовно з'єднаними активним

опором та індуктивністю, які відображають основні характеристики захисного резистора: $R_1, R_2, \dots R_n$; $L_1, L_2, \dots L_n$. Як видно зі схеми, при розряді ЄНЕ струм розряду кожного модуля протікає через захисний резистор. Таким чином, параметри резистора можуть впливати на форму й значення імпульсу струму, створюваного ЄНЕ. Для виключення такого впливу, як правило, величину активного опору й індуктивності захисного резистора вибирають із умов, щоб еквівалентні опір та індуктивність всіх резисторів були набагато меншими відповідних параметрів зовнішнього кола розряду ЄНЕ (стосовно затисків резисторів).

Нехай усі модулі батареї конденсаторів мають однакову ємність $C_{M1} = C_{M2} = \dots C_{Mn} = C$, а всі захисні резистори однакові активний опір та індуктивність $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$, $L_1 = L_2 = \dots = L_n = L$. За таких умов струм розряду всіх модулів описується однаковою часовою функцією, що дозволяє представити конденсаторну батарею еквівалентною послідовною RLC - гілкою, параметри якої дорівнюють: $C_E = nC$, $R_E = R / n$, $L_E = L / n$. Тоді для виключення впливу захисних резисторів повинні виконуватися такі умови:

$$\frac{R}{n} \leq kR_{ВН} ; \quad \frac{L}{n} \leq kL_{ВН} , \quad (1.1)$$

де $R_{ВН}$, $L_{ВН}$ – відповідно активний опір та індуктивність зовнішнього кола; коефіцієнт k на практиці приймають не більш 0,1.

Тоді найбільші значення параметрів захисних резисторів, що допускаються, визначаються з (1) у такий спосіб:

$$R = nkR_{ВН} ; \quad (1.2)$$

$$L = nkL_{ВН} . \quad (1.3)$$

Найменше значення активного опору захисного резистора визначається тим, що воно повинне бути набагато більше активного

опору каналу пробією конденсатора, що становить 0,01 – 0,1 Ом. На практиці найменше значення опору захисного резистора приймають порядку 1,5 Ом.

До найменшого значення індуктивності захисних резисторів ніяких вимог не ставиться.

При пробії конденсатора в одному з модулів (аварійний модуль) на стадії заряду еквівалентна електрична схема розряду справних модулів приймає вигляд, показаний на рис. 1.2 а.

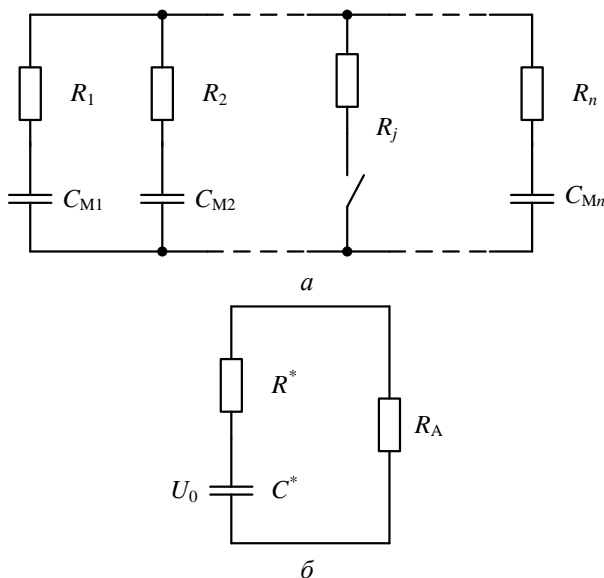


Рисунок 1.2 – Еквівалентна схема розряду батареї на аварійний модуль

Схема складена з припущенням, що індуктивність захисних резисторів і опір пробитого конденсатора мають значення, які не впливають на перехідний процес, і аварійний модуль має номер j . Якщо всі ємності й опори в схемі мають однакове значення, вона перетвориться в еквівалентну схему, показану на рис. 1.2 б. На схемі

позначено: R_A – активний опір аварійного модуля, R^* – еквівалентний активний опір справних модулів, C^* – еквівалентна ємність справних модулів, U_0 – зарядна напруга конденсаторної батареї. Значення параметрів схеми визначаються за співвідношеннями

$$R_A = R, \quad R^* = R / (n-1), \quad C^* = (n-1) C. \quad (1.4)$$

Тоді енергія, що виділяється адіабатично (без тепловіддачі за час виділення) у резисторі аварійного модуля, визначається зі співвідношення

$$W_A = \frac{C^* U_0^2}{2} \frac{R_A}{R_A + R^*}. \quad (1.5)$$

При великій кількості модулів енергія, що виділяється в захисному резисторі, близька до енергії, яка запасасться батареєю конденсаторів.

Максимальне значення імпульсної напруги, що прикладається до захисного резистора в аварійному режимі, визначимо зі схеми, наведеної на рис. 1.2 б:

$$U_{RA} = U_0 \frac{R_A}{R_A + R^*}. \quad (1.6)$$

З огляду на те, що $R_A > R^*$, на практиці приймають $U_{RA} = U_0$.

Найбільшу постійну (пульсуючу) напругу, що прикладається до захисного резистора в режимі заряду, визначимо зі схеми, наведеної на рис. 1.1, нехтуючи впливом індуктивності захисних резисторів:

$$U_R = U_0 \frac{R}{nR_{\zeta\delta\delta}}. \quad (1.7)$$

Слід зазначити, що при великих значеннях енергії, що запасасться в СНЕ, захисні резистори мають масогабаритні показники, які

виходять за економічно виправдані рамки, і необхідно застосовувати менш витратні схеми захисту.

1.2. Кільцева схема захисту

Для зменшення масогабаритних показників захисних резисторів може бути використана схема захисту з резисторами, включеними між модулями таким чином, що вони утворять замкнутий контур (кільцева схема захисту) [2]. Таку схему показано на рис. 1.3.

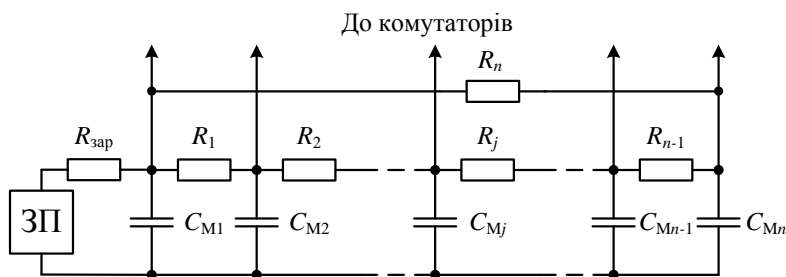


Рисунок 1.3 – Кільцева схема захисту

У кільцевій схемі захисту заряд ЄНЕ здійснюється від зарядного пристрою ЗП через зарядний резистор $R_{зар}$ і захисні резистори R_1, R_2, \dots, R_n . Особливістю цієї схеми є те, що захисні резистори не включені в коло розряду ЄНЕ і відповідно їхні параметри не впливають на формування імпульсу розрядного струму ЄНЕ.

У зв'язку з цим до індуктивності захисного резистора ніяких вимог не ставиться. Найменше значення опору резистора, як і у випадку схеми захисту, розглянутої в п.1.1, не може бути менше 1,5 Ом. Найбільше значення опору визначається з умови, що час заряду батареї не повинен бути більше деякої величини, обумовленої технічними умовами на конденсатори або технологічними умовами роботи ЄНЕ.

Верхня оцінка постійної заряду ЄНЕ в схемі, наведеній на рис. 1.3, за умови, що $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$, може бути обчислена за формулами, які отримані з припущенням, що всі конденсатори батареї зосереджені в точці кільцевої схеми, протилежній точці підключення до неї зарядного резистора $R_{\text{зар}}$:

– при непарній кількості модулів $n = 3, 5, 7, \dots$

$$\tau_{\zeta\grave{\alpha}\delta} = n \left(R_{\zeta\grave{\alpha}\delta} + R \frac{n-1}{4} \right) C_M, \quad (1.8)$$

– при парній кількості модулів $n = 2, 4, 6, \dots$

$$\tau_{\zeta\grave{\alpha}\delta} = n \left(R_{\zeta\grave{\alpha}\delta} + R \frac{n}{4} \right) C_M. \quad (1.9)$$

Оцінка часу заряду може бути розрахована за формулою

$$t_{\zeta\grave{\alpha}\delta} = k \tau_{\zeta\grave{\alpha}\delta}, \quad (1.10)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від способу заряду; для заряду від джерела постійної напруги $k = 5$; для заряду від однофазної системи випрямлення $k = 15$.

Максимальна енергія, що виділяється в захисному резисторі, приєднаному до виводу аварійного модуля, не перевищує $3W_M$, де W_M – енергія, що запасається в модулі [2].

Найбільше значення імпульсної напруги, що прикладається до захисного резистора в аварійному режимі, приймається рівним зарядній напрузі батареї $U_{RA} = U_0$, а в режимі заряду оцінюється за такою формулою, з припущенням, що ємність модуля, який підключений до зарядного резистора, заряджається миттєво:

$$U_R = U_0 \frac{R}{R + 2R_{\text{зад}}} . \quad (1.11)$$

1.3. Основні вимоги до захисних резисторів

1.3.1. Активний опір захисного резистора повинен бути в інтервалі, нижня границя якого дорівнює 1,5 Ом, а верхня визначається залежно від схеми захисту за співвідношенням (1.2) або з використанням (1.8) – (1.10).

1.3.2. Величина індуктивності захисних резисторів для схеми з резистором, включеним у коло розряду ЄНЕ на навантаження, повинна бути не більше обчисленої за (1.3).

1.3.3. Ізоляція захисного резистора повинна витримувати постійну (пульсуючу) напругу в режимі заряду, визначену за формулами (1.7) і (1.11), а в аварійному режимі – імпульсну напругу з максимальним значенням, рівним зарядній напрузі ЄНЕ.

1.3.4. Захисний резистор повинен бути розрахований на адіабатичне виділення в ньому енергії аварійного режиму, яка для схеми захисту з резистором, включеним у коло розряду ЄНЕ, визначається за формулою (1.5), а для кільцевої схеми захисту становить $3W_M$ – три енергії, що запасається в модулі.

2. Типи елементів, використовувані як захисні резистори

Як захисні резистори в ЄНЕ найчастіше використовуються два типи елементів: високовольтні дротяні резистори (найчастіше індивідуального виготовлення) і резистори промислового виготовлення типу ТВО [3, 4].

2.1. Дротяні резистори, загальний вигляд яких показаний на рис. 2.1 і рис. 2.2, являють собою ізоляційний каркас (звичайно кругового перерізу), на який в один шар намотується дріт з високим



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд високовольтного дрогоного резистора C5 – 40В



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд високовольтного дротяного резистора індивідуального виготовлення із зустрічним намотуванням

омічним опором (провідний елемент). На рис. 2.1 показаний дротяний резистор промислового виготовлення С5-40В-500 Вт номінальним опором 1 кОм. На рис. 2.2 – дротяний резистор індивідуального виготовлення. Характеристики дроту, який застосовується для намотування, наведено в додатку Д.3. При виготовленні резисторів застосовуються звичайне й зустрічне намотування, схеми яких показані на рис. 2.3 і рис. 2.4. Зустрічне намотування використовується для зменшення індуктивності захисного резистора. На рис. 2.5 показані основні елементи конструкції дротяних резисторів індивідуального виготовлення. Для механічного закріплення витків дріт 5, як правило, укладається у гвинтовий паз, що нарізується з певним кроком на поверхні ізоляційного каркасу 1 з використанням токарного верстата. Застосовується також бандажування за допомогою ізоляційної стрічки та ізоляційне покриття поверхні резистора 6 на основі лаку або епоксидного компаунду. При зустрічному намотуванні в місцях контакту двох витків дроту прокладають тонку ізоляцію для виключення іскріння.

Для кріплення резистори мають фланці 2 з нарізними отворами й нарізними шпильками 3. Дріт прикріплюється за допомогою гвинтів 4 безпосередньо до фланців, які одночасно виконують функцію струмопідводів.

Відзначимо особливість визначення діаметра намотування:

– якщо дріт намотується безпосередньо на каркас діаметром d_k , як показано на рис. 2.3 і рис. 2.4, то діаметр намотування визначається як

$$d_n = d_k + d_{пр}. \quad (2.1)$$

Якщо намотування здійснюється у гвинтовий паз, як показано на рис. 2.5, то

$$d_n = d_k - d_{пр}. \quad (2.2)$$

Величина перемички t повинна бути такою, щоб виключити відкол матеріалу при нарізці гвинтового паза. При використанні склотекстолітових труб на епоксидному зв'язуючому приймають $t \geq 4$ мм.

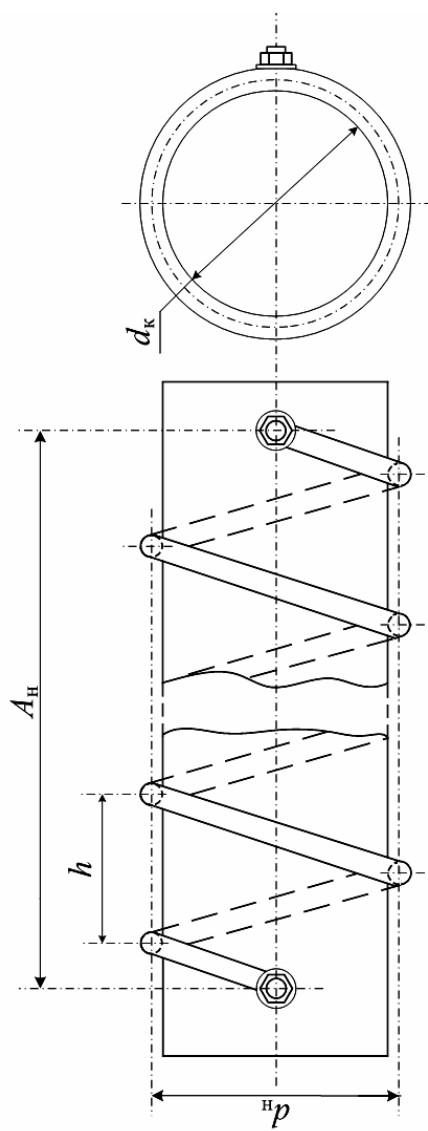


Рисунок 2.3 – Схема звичайного одношарового намотування

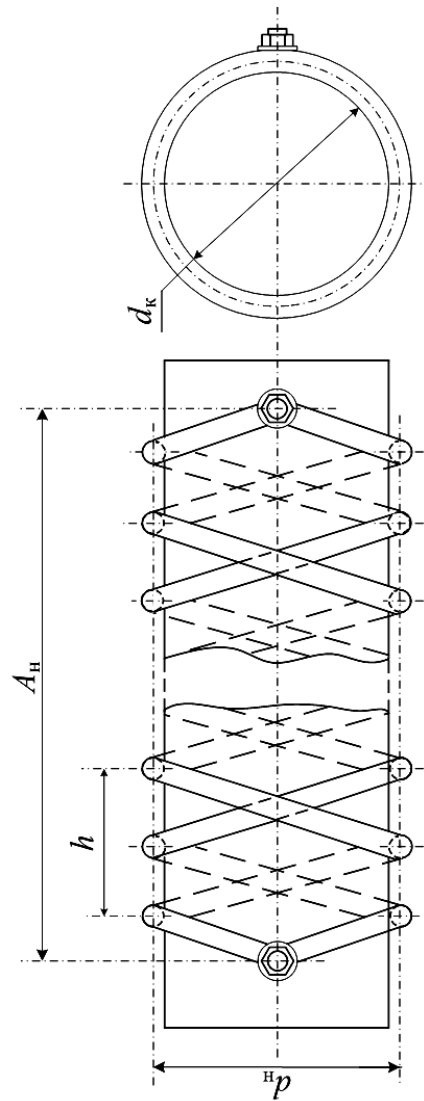


Рисунок 2.4 – Схема зустрічного одношарового намотування

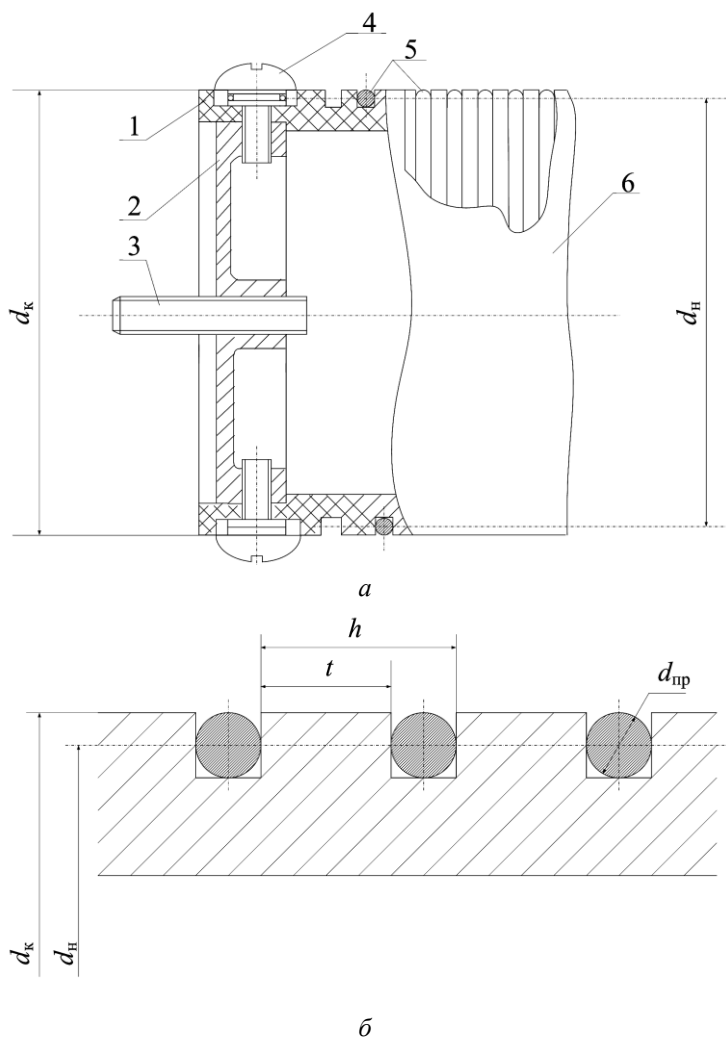


Рисунок 2.5 – Основні елементи конструкції дріт'яних резисторів індивідуального виготовлення

2.2. Резистори ТВО являють собою об'ємний провідний елемент, захищений склокерамічною оболонкою [3]. Загальний вигляд резисторів показаний на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд резисторів типу ТВО.
Зверху вниз: ТВО-60, ТВО-20, ТВО-10 і ТВО-5

Внутрішня будова резисторів типу ТВО показана на рис. 2.7.

Найбільш часто використовуються резистори ТВО-5, ТВО-10, ТВО-20 і ТВО-60. Цифри після позначення типу резистора ТВО означають потужність розсіювання резистора у ватах. Резистори ТВО-5, ТВО-10, ТВО-20 виготовляються з осьовими дрітряними виводами, резистори ТВО-60 виготовляються із пластинчастими виводами. Основні характеристики резисторів ТВО наведені в додатку Д.4. Як правило, використовуються блоки захисних резисторів, що складаються з декількох резисторів ТВО.



ТВО-60



ТВО-10

Рисунок 2.7 – Резистори типу ТВО після аварійного руйнування

3. Розрахунок параметрів резисторів із дроту з високим омичним опором

3.1. Розрахунок активного опору

Активний опір дрітяного резистора розраховується за формулою

$$R = \rho \frac{A_{\text{д}}}{S_{\text{д}}}, \quad (3.1)$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу провідного елемента; $A_{\text{д}}$ – довжина провідного елемента; $S_{\text{д}}$ – площа перерізу провідного елемента.

Якщо провідний елемент складається з декількох дротів круглого перерізу, то площа перерізу провідного елемента дорівнює

$$S_{\text{д}} = \frac{k_{\text{д}} \pi d_{\text{д}}^2}{4}, \quad (3.2)$$

де $k_{\text{д}}$ – кількість дротів у провідному елементі; $d_{\text{д}}$ – діаметр дроту.

Питомий опір ρ і діаметри $d_{\text{д}}$ дротів, найчастіше використовуваних при виготовленні дрітяних резисторів, наведені в додатку Д.3.

Довжина провідного елемента

$$A_{\text{д}} = \omega A_{\text{в}}, \quad (3.3)$$

де ω – кількість витків намотування; $A_{\text{в}}$ – довжина витка провідного елемента.

Для намотування на круговому циліндричному каркасі довжина витка дорівнює (див. рис. 2.3 і рис. 2.4)

$$A_a = \sqrt{(\pi d_1)^2 + h^2}, \quad (3.4)$$

де d_n – діаметр намотування; h – крок намотування.

Довжина намотування визначається за формулою

$$A_1 = \omega h. \quad (3.5)$$

Рекомендований ряд кроків для нарізки гвинтових пазів наведений у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Рекомендований ряд кроків

Кроки гвинтової лінії, мм
4,5; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 14; 16; 18; 24; 28; 30; 36

3.2. Розрахунок індуктивності

3.2.1. Індуктивність звичайного одношарового намотування розраховується як індуктивність циліндричного соленоїда [5]. Під соленоїдом розуміється циліндрична котушка, яка складається з великої кількості витків дроту, що утворюють гвинтову лінію. Витки котушки для розрахунку індуктивності подають системою послідовно з'єднаних кільцевих струмів. Розрахункова модель звичайного намотування показана на рис. 3.1 а. Напрямок струмів у всіх витках однаковий.

Індуктивність резистора зі звичайним намотуванням розраховується за формулою

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \omega^2 d_1 \Phi, \quad (3.6)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн /м; ω – кількість витків; d_n – діаметр намотування; Φ – коефіцієнт, що залежить від відношення $\alpha = \frac{A_f}{d_f}$ [5].

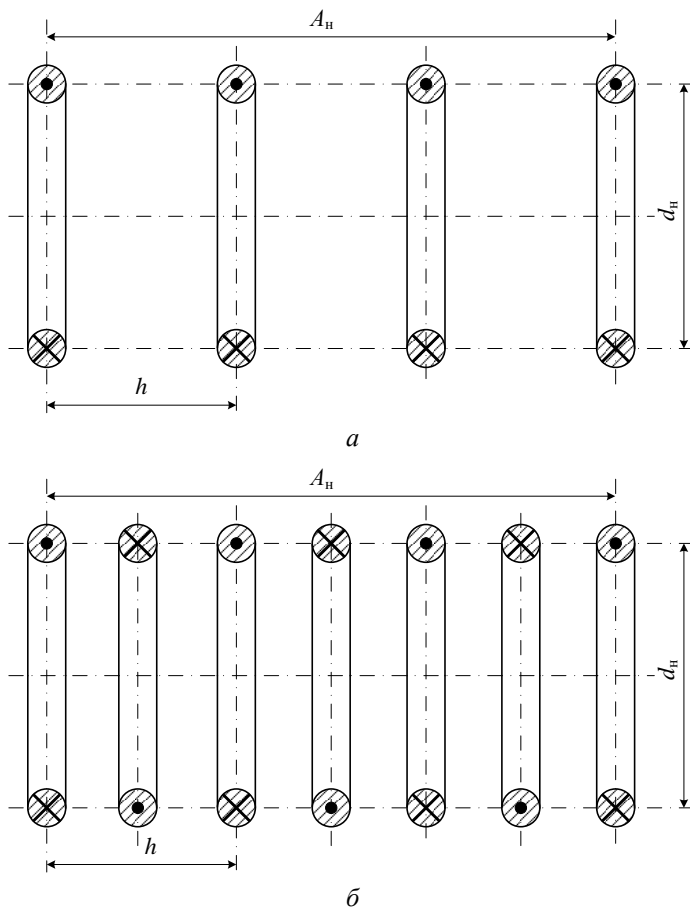


Рисунок 3.1 – Моделі намотування для розрахунку індуктивності

Якщо $\alpha > 1$, то

$$\Phi = \frac{\pi^2}{2\alpha^2} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{8}{3\pi} - \frac{\beta^3}{8} + \frac{\beta^5}{16} - \frac{15}{128}\beta^7 + \frac{21}{128}\beta^9 - \frac{315}{1024}\beta^{11} + \dots \right), \quad (3.7)$$

$$\text{де } \beta = \frac{1}{\sqrt{1+4\alpha^2}}.$$

Якщо $\alpha \leq 1$, то

$$\Phi = 2\pi \left[\left(1 + \frac{\alpha^2}{8} - \frac{\alpha^4}{64} + \dots \right) \ln \frac{4}{\alpha} - \frac{1}{2} + \frac{\alpha^2}{32} + \frac{\alpha^4}{96} + \dots \right]. \quad (3.8)$$

При необхідності може бути зроблений більш точний розрахунок з урахуванням ізоляції (кроку намотування), методика якого наведена у [5].

3.2.2. Точний розрахунок індуктивності зустрічного намотування досить складний. У загальному випадку індуктивність зустрічного намотування може бути розрахована за методикою, викладеною в [6], з використанням розрахункової моделі, показаної на рис. 3.1 б. Звернемо увагу, що у наведеній моделі напрями струму у витках змінюються по черзі.

На практиці можна використовувати такі оцінки індуктивності зустрічного намотування, отримані експериментальним шляхом: при діаметрі намотування $d_n = 71 - 86$ мм, кроці намотування $h = 7 - 20$ мм, кількості витків $\omega = 1 - 32$ питома індуктивність не перевищує $L_{\text{пит}} = 0,08$ мкГн / виток. Тоді індуктивність котушки із зустрічним намотуванням і параметрами, що знаходяться у цих діапазонах, у мкГн:

$$L = 0,08\omega. \quad (3.9)$$

Під кількістю витків намотування розуміється кількість витків одного дроту.

3.3. Розрахунок теплового режиму

Особливістю теплового режиму захисних резисторів є їх практично миттєвий нагрів й відсутність теплообміну з навколишнім середовищем за час нагріву (адіабатичний нагрів).

У цьому випадку перегрів провідного елемента Θ щодо початкової температури визначається за формулою

$$\Theta = \frac{W}{cm}, \quad (3.10)$$

де W – енергія, що поглинається резистором; c – питома теплоємність матеріалу провідного елемента (див. у табл. Д.3.1); m – маса провідного елемента.

Маса провідного елемента визначається за формулою

$$m = \gamma A_{\text{пр}} S_{\text{пр}}, \quad (3.11)$$

де γ – щільність матеріалу (див. у табл. Д.3.1); $A_{\text{пр}}$ – довжина провідного елемента, визначається за (3.4) – (3.5); $S_{\text{пр}}$ – площа поперечного перерізу провідного елемента.

Величина максимального перегріву не повинна перевищувати допустимої температури експлуатації ізоляційного каркаса й матеріалу бандажа, тобто $T = \Theta + 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{доп}}$. Показники нагрівостійкості ізоляційних матеріалів наведені в додатку Д.5. При використанні в якості каркасу паперово-бакелітових і текстолітових виробів необхідно приймати $\Theta \leq 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$, склотекстолітових на епоксидному зв'язуючому – $\Theta \leq 135 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4. Електрична міцність

Електрична міцність конструкції резистора – це властивість резистора витримувати без пробоя усередині і по поверхні напругу, яка прикладається до нього.

Електрична міцність дрових резисторів забезпечується вибором середньої напруженості електричного поля уздовж їхньої поверхні. На практиці приймають $E = 4 \text{ кВ / см} = 4 \cdot 10^5 \text{ В / м}$ [7].

Для виключення коронування фланці резистора забезпечуються екранами (див. рис. 2.1) або вони виконуються з додатковими округленими поверхнями, що виступають за аксіальний розмір каркаса (див. рис. 2.2).

4. Блоки захисних резисторів на базі резисторів ТВО

4.1. Резистори промислового виготовлення випускаються зі значеннями номінальної величини опору, яке знаходиться в певному діапазоні й відповідає значенням деякого ряду опорів [8]. Діапазони зміни номінального опору резисторів ТВО наведені в табл. Д.4.2.

4.2. Струмоведучий елемент об'ємних резисторів типу ТВО, як показано на рис. 4.1, являє собою послідовне з'єднання провідників різного перерізу й провідності: струмопідвід – резистивний елемент – струмопідвід.

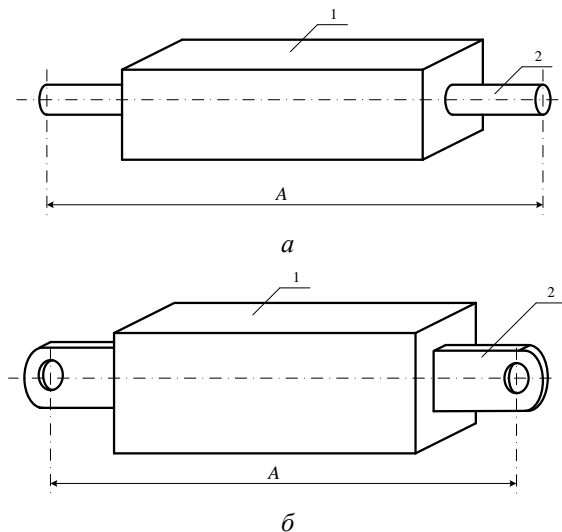


Рисунок 4.1 – Струмоведучий елемент об'ємних резисторів типу ТВО:

a – резистори ТВО-5, ТВО-10, ТВО-20; *б* – резистор ТВО-60;

1 – резистивний елемент; 2 – струмопідвід

Точний розрахунок індуктивності таких конструкцій досить складний [5]. Тому на практиці користуються оцінкою індуктивності, що припустимо, враховуючи малість індуктивності об'ємних

резисторів у порівнянні з індуктивністю інших елементів розрядного кола.

Як відомо [5], індуктивність прямолінійного провідника тим менша, чим більше його переріз. Це дозволяє дати оцінку індуктивності "зверху", приймаючи як розрахункову модель струмоведучих елементів резистора провідник довжиною A з перерізом, рівним перерізу струмопідводів, і оцінку "знизу", приймаючи як розрахункову модель струмоведучих частин резистора провідник довжиною A з перерізом, рівним перерізу резистивного елемента. Таким чином, оцінка індуктивності об'ємних резисторів може бути зроблена за допомогою співвідношень для визначення індуктивності прямолінійних провідників кругового й прямокутного перерізу, наведених, наприклад в [5].

Для прямолінійного провідника кругового перерізу

$$L = \frac{\mu_0 A}{2\pi} \left(\ln \frac{2A}{r} - \frac{3}{4} + \frac{128r}{45\pi A} - \frac{r^2}{4A^2} \right), \quad (4.1)$$

де L – індуктивність провідника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна постійна; A – довжина провідника; r – радіус поперечного перерізу провідника.

Для прямолінійного проводу прямокутного перерізу

$$L = \frac{\mu_0 A}{2\pi} \left(\ln \frac{2A}{b+c} + \frac{1}{2} \right) \quad (4.2)$$

де b , c – сторони прямокутника, що є поперечним перерізом провідника.

Оцінка індуктивності резисторів наведена в табл. 4.1.

4.3. Електрична міцність резисторів промислового виготовлення досягається заданням режимів та умов експлуатації, а також способів

кріплення, передбачених у технічних умовах на них. У випадку їхньої зміни необхідні спеціальні випробування.

Таблиця 4.1 – Індуктивність резисторів ТВО

Тип резистора	Оцінка індуктивності резистора, Гн	
	нижня	верхня
ТВО-5	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
ТВО-10	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$
ТВО-20	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$
ТВО-60	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$

4.4. Блоки резисторів. При проектуванні високовольних пристроїв застосування блоків резисторів ТВО доцільно у таких випадках:

- 1) енергія, яку необхідно поглинути, більше енергії, що може поглинути одиничний резистор без порушення його працездатності;
- 2) необхідне регулювання параметрів процесу протікання струму шляхом зміни схеми;
- 3) відсутність одиничних резисторів з необхідними параметрами.

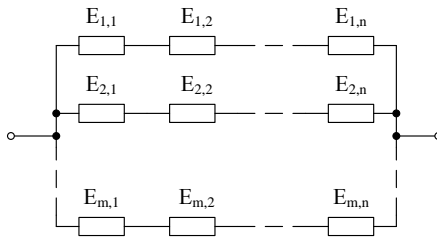
Застосування блоків захисних резисторів в основному пов'язане з пунктом 1.

Електрична схема блока резисторів у загальному випадку являє собою послідовно-паралельне з'єднання одиничних елементів. Варіанти такого з'єднання подані на рис. 4.2.

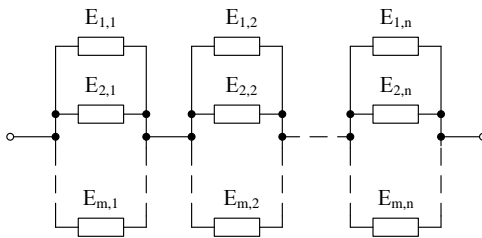
Як видно з рис. 4.2, опір блоку R_B при будь-якій схемі з'єднання елементів дорівнює

$$R_B = R \frac{n}{m}, \quad (4.3)$$

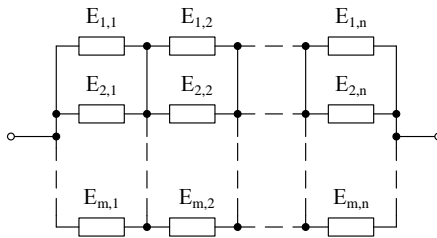
де $R = R_{1,1} = R_{1,2} = \dots = R_{m,n}$ – опір одиничного елемента; n – кількість послідовно з'єднаних елементів у блоці; m – кількість паралельно з'єднаних елементів у блоці.



a



б



в

Рисунок 4.2 – Схема з'єднання одиничних елементів у блоці:
a – паралельне з'єднання груп послідовно з'єднаних елементів;
б – послідовне з'єднання груп паралельно з'єднаних елементів;
в – послідовно-паралельне з'єднання елементів

Аналогічне співвідношення має місце для визначення індуктивності блока L_B

$$L_B = L \frac{n}{m}, \quad (4.4)$$

де $L = L_{1,1} = L_{1,2} = \dots = L_{m,n}$ – індуктивність одиничного елемента.

Звернемо увагу на те, що формула (4.4) справедлива при відсутності взаємоіндуктивності між елементами (ідеалізована розрахункова модель індуктивності блока). На практиці (4.4) можна використовувати, якщо взаємоіндуктивність між поруч розташованими елементами, принаймні, на порядок менше індуктивності одиничного елемента. Якщо ця умова не виконується, то розрахунок необхідно проводити з урахуванням взаємної індуктивності одиничних елементів, наприклад за рекомендаціями, викладеними в [5]. Оцінка взаємної індуктивності може бути проведена тільки на стадії розробки конструкції блока, а при початкових розрахунках використовується оцінка індуктивності за формулою (4.4).

Наведемо ще два співвідношення, що впливають із теорії електричних кіл [9], справедливих за умови, що всі елементи мають однаковий опір та індуктивність.

Якщо одиничний елемент розрахований на експлуатацію при номінальній напрузі U , то номінальна напруга експлуатації блока

$$U_B = nU. \quad (4.5)$$

Якщо одиничний елемент в адіабатичному режимі поглинає енергію W , без порушення його працездатності, то енергія, що може поглинути блок елементів, визначається за формулою

$$W_B = mnW. \quad (4.6)$$

5. Розрахунок параметрів захисних резисторів

5.1. Загальні вимоги

Резистори повинні задовольняти вимоги до опору, індуктивності, термічної стійкості та електричної міцності, викладені у п. 1.3.

Резистори повинні мати мінімально можливі масогабаритні показники.

У додатку Д.6 показані приклади виконання загального вигляду захисних резисторів і фотографії ЄНЕ із установленими захисними резисторами.

5.2. Розрахунок дротяних резисторів

Вирішуючи спільно (3.1), (3.10) і (3.11) відносно довжини й перерізу провідного елемента, одержимо

$$S_{i\delta} = \sqrt{\frac{W\rho}{c\Theta\gamma R}}; \quad (5.1)$$

$$A_{i\delta} = \sqrt{\frac{WR}{c\Theta\gamma\rho}}. \quad (5.2)$$

У наведених співвідношеннях енергія W , що поглинається, і опір R відомі з електричних розрахунків. Питома теплоємність c , щільність γ і питомий електричний опір ρ стають відомими після вибору матеріалу провідного елемента. Перегрів Θ , що допускається, визначається прийнятим матеріалом ізоляційного каркаса.

Таким чином, визначені за (5.1) і (5.2) переріз і довжина провідного елемента є найменшими, які задовольняють величині перегріву й опору.

Знаючи переріз, з (3.2) визначаємо діаметр дроту:

$$d_{i\delta} = \sqrt{\frac{4S_{i\delta}}{k_{i\delta} \pi}}. \quad (5.3)$$

Спочатку задаємося $k_{\text{пр}} = 1$. Якщо обчислений діаметр дроту буде більше 2 мм, то у зв'язку зі складностями намотування такого дроту доцільно прийняти $k_{\text{пр}} = 2$ і повторити розрахунок. При повторенні ситуації приймають $k_{\text{пр}} = 3$ і так далі.

Вимоги до індуктивності захисного резистора і його електричної міцності задовольняються вибором діаметра намотування d_n і кроку намотування h , які при відомій довжині провідного елемента $A_{\text{пр}}$ визначають кількість витків намотування ω з (3.3) і (3.4), а також довжину намотування A_n з (3.5).

Як видно з наведених міркувань, процес визначення параметрів захисного резистора можливий тільки при проведенні різноманітних розрахунків, які зручно проводити з використанням програмного продукту Excel [10] (див. додаток Д.2).

5.3. Приклад розрахунку дротяного резистора

5.3.1. Розрахуємо захисний резистор зі звичайним намотуванням при таких вхідних даних: активний опір резистора $1,5 \text{ Ом} \leq R \leq 5 \text{ Ом}$, індуктивність $L \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$, енергія, що поглинається в аварійному режимі, $W = 5 \cdot 10^4 \text{ Дж}$, імпульсна напруга $U = 3 \cdot 10^4 \text{ В}$.

Приймемо як матеріал провідного елемента ніхром марки Х15Н60 (див. табл. Д.3.1), а як каркас – склотекстолітовий циліндр на епоксидному зв'язуючому (див. додаток Д.5). Тоді, використовуючи співвідношення (5.1), визначимо мінімальну площу поперечного перерізу провідного елемента:

$$S_{\text{іѳ}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^4 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}}{0,461 \cdot 135 \cdot 8,2 \cdot 10^{-6} \cdot 5}} = 4,64 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Далі, приймаючи кількість ниток дроту провідного елемента рівним одиниці, визначимо діаметр дроту за (5.3)

$$d_{\text{д}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,64 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,00243 \text{ м.}$$

З огляду на те, що обчислений діаметр дроту більше 2 мм, збільшуємо кількість дротів на 1 і повторюємо розрахунки:

$$d_{\text{д}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,64 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi}} = 0,00172 \text{ м.}$$

Використовуючи табл. Д.3.2, приймаємо найближчий більший діаметр $d_{\text{д}} = 1,8 \text{ мм}$.

Діаметр каркаса вибираємо за табл. Д.5.1 $d_{\text{к}} = 100 \text{ мм}$ (циліндр із внутрішнім діаметром $\varnothing 80 \text{ мм}$ і товщиною стінки 10 мм). Приймаємо намотування у гвинтовий паз і обчислюємо діаметр намотування за формулою (2.2) $d_{\text{н}} = 98,2 \text{ мм}$. Мінімальний крок намотування визначимо зі схеми розташування дротів у пазу, показаної на рис. 5.1:

$$h_{\text{min}} = t + 2d_{\text{д}} = 4 + 2 \cdot 1,8 = 7,6 \text{ мм}.$$

Округляємо до найближчого більшого значення з ряду, наведеного в табл. 3.1, $h = 8 \text{ мм}$.

Подальші розрахунки дротяного резистора зручніше робити в діалоговому режимі за програмою, написаною на Excel, інтерфейс якої показаний на рис. 5.2, а вміст комірок – на рис. 5.3.

Результати розрахунку показані на рис. 5.4. Після введення властивостей провідникового матеріалу, електротехнічних характеристик резистора, діаметра дроту, кількості дротів, діаметра намотування й величини кроку вміст стовпця "С" має вигляд, показаний у стовпці "Номер расчета 0".

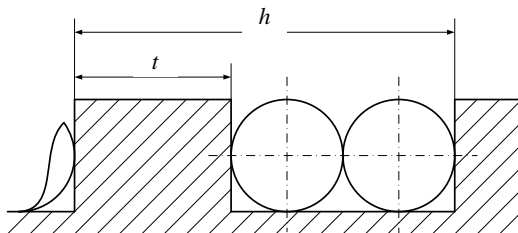


Рисунок 5.1 – Схема розташування дровів

Наступним кроком визначимо кількість витків, що задовольняє величині опору. Для цього використовуємо процедуру "**Подбор параметра**" (див. додаток Д.2) або поступове збільшення кількості витків на одиницю. Результати розрахунку наведені на рис. 5.4 у стовпці "Номер расчета 1". Як видно з розрахунку, величина перегріву, опір і напруженість електричного поля уздовж поверхні резистора задовольняють висунуті до них вимоги, однак значення індуктивності більше допустимого.

Для зменшення індуктивності резистора збільшимо крок намотування (при цьому зменшується коефіцієнт Φ), вибираючи більші значення з ряду, наведеного в табл. 3.1. Результати розрахунків показані на рис. 5.4 у стовпцях "Номер расчета 2, 3 і 4". При кроці $h = 14$ мм усі вимоги, висунуті до резистора, будуть виконані.

5.3.2. Розрахунок захисних резисторів із зустрічним намотуванням проводиться аналогічно з таким коректуванням і деякими обмеженнями:

- кількість дровів повинна бути парною;
- для розрахунку індуктивності в комірку **C31** вводиться формула (3.5) у вигляді: "**0,00000008*C13**", а комірки **C25–C30** не використовуються;
- кількість витків, діаметр намотування й величина кроку повинні відповідати п. 3.2.2.

	A	B	C	D
1	<u>Исходные данные</u>			
2	Свойства проводникового материала			
3	Удельное сопротивление	$\rho =$	1,10E-06	Ом·м
4	Плотность	$\gamma =$	8,20E+06	г/м ³
5	Удельная теплоемкость	$c =$	0,461	Дж/(г·К)
6	Электрические характеристики			
7	Поглощаемая энергия	$W =$	5,00E+04	Дж
8	Прикладываемое напряжение	$U =$	3,00E+04	В
9	Параметры конструкции			
10	Диаметр проволоки	$d_{np} =$	1,80E-03	м
11	Количество проволок	$k_{np} =$	2	
12	Диаметр намотки	$d_n =$	9,82E-02	м
13	Количество витков	$\omega =$	20	
14	Шаг намотки	$h =$	8,00E-03	м
15				
16	<u>Расчетные данные</u>			
17	Длина витка	$A_v =$	3,09E-01	м
18	Длина проволоки	$A_{np} =$	6,17E+00	м
19	Длина намотки	$A_n =$	1,60E-01	м
20	Площадь сечения проволоки	$S_{np} =$	5,09E-06	м ²
21	Масса проволоки	$m =$	2,58E+02	г
22	Перегрев проволоки	$\Theta =$	4,21E+02	К
23	Активное сопротивление	$R =$	1,33E+00	Ом
24	Напряженность ЭП вдоль пов-ти	$E_{пов} =$	1,88E+05	В/м
25	Отношение A_n/d_n	$\alpha =$	1,63E+00	
26		$\beta =$	2,93E-01	
27	Буферная переменная	$x =$	2,56E+00	
28		$\Phi(\alpha > 1) =$	4,75E+00	
29		$\Phi(\alpha \leq 1) =$	4,74E+00	
30	Козф-т для расчета индуктивности	$\Phi =$	4,753E+00	
31	Индуктивность	$L =$	1,867E-05	Гн

Рисунок 5.2 – Интерфейс програми розрахунку дротяних резисторів зі звичайним намотуванням на циліндричному каркасі

	B	C
1		
2		
3	$\rho =$	0,0000011
4	$\gamma =$	8200000
5	$c =$	0,461
6		
7	$W =$	50000
8	$U =$	30000
9		
10	$dnp =$	0,0018
11	$k_{np} =$	2
12	$dn =$	0,0982
13	$\omega =$	20
14	$h =$	0,008
15		
16		
17	$A_b =$	=КОРЕНЬ((ПИ()*C12)^2+C14^2)
18	$A_{np} =$	=C13*C17
19	$A_n =$	=C13*C14
20	$S_{np} =$	=C11*ПИ()*C10^2/4
21	$m =$	=C4*C18*C20
22	$\Theta =$	=C7/C5/C21
23	$R =$	=C3*C18/C20
24	$E_{пов} =$	=C8/C19
25	$\alpha =$	=C19/C12
26	$\beta =$	=1/КОРЕНЬ(1+4*C25^2)
27	$x =$	=(1/C26-8/3/ПИ()-C26^3/8+C26^5/16-15*C26^7/128+21*C26^9/128)
28	$\Phi(\alpha>1) =$	=ПИ()^2*(C27-315*C26^11/1024+297*C26^13/512)/2/C25^2
29	$\Phi(\alpha\leq 1) =$	=2*ПИ()*((1+C25^2/8-C25^4/64)*LN(4/C25)-1/2+C25^2/32+C25^4/96)
30	$\Phi =$	=ЕСЛИ(C25>1;C28;C29)
31	$L =$	=(0,0000001)*C13^2*C12*C30

Рисунок 5.3 – Вміст комірок програми

	Номер расчета				
	0	1	2	3	4
$\rho =$	1,10E-06	1,10E-06	1,10E-06	1,10E-06	1,10E-06
$\gamma =$	8,20E+06	8,20E+06	8,20E+06	8,20E+06	8,20E+06
$c =$	0,461	0,461	0,461	0,461	0,461
$W =$	5,00E+04	5,00E+04	5,00E+04	5,00E+04	5,00E+04
$U =$	3,00E+04	3,00E+04	3,00E+04	3,00E+04	3,00E+04
$d_{np} =$	1,80E-03	1,80E-03	1,80E-03	1,80E-03	1,80E-03
$k_{np} =$	2	2	2	2	2
$d_n =$	9,82E-02	9,82E-02	9,82E-02	9,82E-02	9,82E-02
$\omega =$		74	74	74	74
$h =$	8,00E-03	8,00E-03	1,00E-02	1,20E-02	1,40E-02
$A_v =$	3,09E-01	3,09E-01	3,09E-01	3,09E-01	3,09E-01
$A_{np} =$	0,00E+00	2,28E+01	2,28E+01	2,28E+01	2,29E+01
$A_n =$	0,00E+00	5,92E-01	7,40E-01	8,88E-01	1,04E+00
$S_{np} =$	5,09E-06	5,09E-06	5,09E-06	5,09E-06	5,09E-06
$m =$	0,00E+00	9,53E+02	9,53E+02	9,53E+02	9,54E+02
$\Theta =$	#ДЕЛ/0!	1,14E+02	1,14E+02	1,14E+02	1,14E+02
$R =$	0,00E+00	4,94E+00	4,94E+00	4,94E+00	4,94E+00
$E_{пов} =$	#ДЕЛ/0!	5,07E+04	4,05E+04	3,38E+04	2,90E+04
$\alpha =$	0,00E+00	6,03E+00	7,54E+00	9,04E+00	1,05E+01
$\beta =$	1,00E+00	8,27E-02	6,62E-02	5,52E-02	4,73E-02
$x =$	1,36E-01	1,12E+01	1,43E+01	1,73E+01	2,03E+01
$\Phi(\alpha>1) =$	#ДЕЛ/0!	1,53E+00	1,24E+00	1,04E+00	8,99E-01
$\Phi(\alpha\leq 1) =$	#ДЕЛ/0!	1,29E+02	3,87E+02	9,28E+02	1,92E+03
$\Phi =$	#ДЕЛ/0!	1,528E+00	1,239E+00	1,042E+00	8,989E-01
$L =$	#ДЕЛ/0!	8,214E-05	6,662E-05	5,603E-05	4,834E-05

Рисунок 5.4 – Результаты розрахунку

Приклад виконання загального виду дротяного резистора показаний на рис. Д.6.1.

5.4. Розрахунок блока резисторів ТВО

Виходячи з найбільшої енергії, що поглинається блоком, W_B , визначимо найменшу кількість елементів, що може містити блок:

$$Q_{\min} = W_B / W, \quad (5.4)$$

де W – допустима енергія, яка поглинається одиничним резистором; для резисторів ТВО-10 і ТВО-60 визначається за матеріалами додатка Д.4.

Виходячи з максимальної імпульсної напруги, що прикладається до блока $U_{B \max}$, визначимо найменшу кількість послідовно з'єднаних елементів, що може містити блок:

$$N_{\min} = U_{B \max} / U, \quad (5.5)$$

де U – максимально допустима імпульсна напруга для одиничного резистора, яка визначається за табл. Д.4.2.

Використовуючи (5.4) і (5.5), визначимо кількість паралельно з'єднаних елементів у блоці:

$$M = Q_{\min} / N_{\min}. \quad (5.6)$$

З (4.3) розрахункове значення опору одиничного елемента при заданому опорі блока визначиться як

$$R_P = R_B \frac{m}{n}. \quad (5.7)$$

Підставимо в (5.7) кількість послідовно й паралельно з'єднаних елементів, визначених за співвідношеннями (5.5) і (5.6), і обчислимо розрахункове значення опору одиничного елемента за цих умов:

$$R_P = R_B \frac{M}{N_{\min}}. \quad (5.8)$$

Порівняємо отримане значення з найближчим значенням із заданого ряду номінальних значень – R_H^s , яке визначається за табл. Д.4.2 і табл. Д.4.3. Якщо виконується умова $R_P = R_H^s$, то вибір величини опору одиничного елемента вважається закінченим. Однак на практиці найчастіше розрахункове значення опору R_P відрізняється від найближчого значення опору ряду R_H^s . Приймаємо найближче значення номінального опору R_H^s та зміною кількості послідовних і паралельних резисторів підберемо величину опору блока у відповідно до такої методики.

При обраному значенні R_H^s розрахункове значення опору блока R_{PB} дорівнює

$$R_{PB} = R_H^s \frac{n}{m}, \quad (5.9)$$

де $n = N_{\min}$; $m = M$.

Якщо в результаті розрахунку за (5.9) отримано R_{PB} значно більше R_B , то необхідно збільшувати кількість паралельно з'єднаних елементів – m або вибрати резистор з меншим номінальним опором. Якщо отримано $R_{PB} < R_B$, то необхідно збільшувати кількість послідовно з'єднаних елементів – n або вибрати резистор з більшим номінальним опором. Критерієм закінчення процедури підбору є величина відносного відхилення $\Delta = 100 \frac{|R_B - R_{PB}|}{R_B} \%$. На практиці приймають $\Delta \leq 10 \%$.

Індуктивність блока резисторів розраховується після вибору кількості послідовно й паралельно з'єднаних елементів за формулою (4.4).

5.5. Приклад розрахунку блока резисторів

Потрібно розрахувати блок резисторів ТВО-10, що має такі параметри: максимальна імпульсна напруга, яку повинен витримувати блок – 20 кВ, максимальна енергія, яку повинен адіабатично поглинути блок без порушення його працездатності, – 10 кДж, активний опір – не більше 10 Ом, індуктивність – не більше 2 мкГн.

З виразу (5.4) визначаємо найменшу кількість елементів, що може містити блок. Енергію, що може поглинатися одним резистором, приймаємо рівною 800 Дж (див. додаток Д.4).

$$Q_{\min} = 1 \cdot 10^4 / 600 = 16,7 \approx 17 \text{ од.}$$

Найменшу кількість послідовно з'єднаних резисторів визначимо з виразу (5.5). Максимально допустиму імпульсну напругу одного резистора приймаємо рівною 10 кВ (див. табл. Д.4.2).

$$N_{\min} = 2 \cdot 10^4 / 1 \cdot 10^4 = 2 \text{ од.}$$

Кількість паралельно з'єднаних елементів у блоці

$$M = 17/2 = 8,5 \approx 9 \text{ од.}$$

Розрахункове значення опору одиничного резистора визначимо з виразу (5.8)

$$R_P = 10 \cdot \frac{9}{2} = 45 \text{ Ом.}$$

Приймаємо найближче значення з ряду (див. табл. Д.4.3) – $R_P = 47 \text{ Ом}$.

При обраному значенні R_P розрахункове значення опору блока

$$R_{PB} = 47 \cdot \frac{2}{9} = 10,44 \text{ Ом},$$

що більше заданого. Тому приймаємо найближче менше значення опору одиничного резистора з ряду, наведеного в табл. Д.4.3, $R_P = 43 \text{ Ом}$. Для цього значення

$$R_{PB} = 43 \cdot \frac{2}{9} = 9,56 \text{ Ом},$$

що задовольняє заданим умовам.

Індуктивність блоку резисторів розраховується за формулою (4.4). Індуктивність одиничного резистора приймаємо рівною $0,19 \text{ мкГн}$ (див. табл. 4.1).

$$L_B = 1,9 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{2}{9} = 4,22 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$$

Усі задані вимоги виконані.

Приклади виконання загального вигляду блоків резисторів показані на рис. Д.6.2 і рис. Д.6.3.

Контрольні запитання

1. Із чим пов'язана необхідність розбивання батареї накопичувальних конденсаторів на окремі модулі?
2. Яка мета захисту конденсаторів батареї при пробі одного з них?
3. Як організовується захист конденсаторної батареї?
4. Які існують основні схеми захисту конденсаторів за допомогою розділових захисних резисторів?
5. Сформулюйте основні вимоги до захисних резисторів у схемі з резисторами, включеними в коло розряду ЄНЕ на навантаження.
6. Сформулюйте основні вимоги до захисних резисторів у кільцевій схемі.
7. Які елементи можуть використовуватися як захисні резистори?
8. Назвіть основні типи намотування дротяних резисторів.
9. Назвіть типорозміри резисторів ТВО, які найбільш часто використовуються як захисні.
10. Які моделі намотування використовуються при розрахунку індуктивності дротяних резисторів?
11. Яким чином оцінюється індуктивність резисторів ТВО?
12. У чому полягає необхідність використання блоків резисторів?
13. Чому дорівнює опір блока резисторів?
14. Чому дорівнює індуктивність блока резисторів?
15. Як визначається енергія, що допускається для адіабатичного поглинання блоком?
16. Сформулюйте загальні вимоги до захисних резисторів.
17. Які вироби використовуються як ізоляційні каркаси дротяних резисторів індивідуального виготовлення?

Контрольні завдання

При заданих найбільших значеннях: імпульсної напруги в аварійному режимі U , енергії, яка виділяється адіабатично W , активного опору R та індуктивності L зробити розрахунок захисних резисторів (блока захисних резисторів) відповідно до завдань.

Завдання 1

- 1) За даними відповідного варіанта в табл. 7.12 провести розрахунок захисного дротяного резистора.
- 2) Виконати ескіз резистора.

Таблиця 7.1 – Варіанти вихідних даних

№ варіанта	U , кВ	W , кДж	R , Ом	L , мкГн
1	30	20	2,7	15
2	100	28	2	10
3	20	30	2,3	25
4	5	30	2	10
5	30	4,5	4,5	25
6	100	4,5	4	30
7	25	10	4,8	10
8	50	5	4	25
9	30	10	5	15
10	10	6	5	35
11	20	7	5,1	10
12	50	7	5	15
13	30	5	13	35
14	100	8	3,7	10
15	20	6	2,9	10
16	50	7,5	3,2	35

Завдання 2

1) За даними відповідного варіанта в табл. 7.2 провести розрахунок блока захисних резисторів з використанням резисторів ТВО-10 і ТВО-60.

2) Виконати ескізи блоків. Відстань між поверхнями двох резисторів у блоці прийняти: для резисторів ТВО-10 не менше 5 мм, для резисторів ТВО-60 не менше 10 мм.

3) Вибрати варіант із меншими масогабаритними показниками. Ієрархія показників: маса блока резисторів, довжина, об'єм блока резисторів. Якщо величини однакових показників для різних варіантів виконання блоків відрізняються не більше ніж на 10 %, то вважати, що цей показник однаковий для розглянутих варіантів.

Таблиця 7.2 – Варіанти вихідних даних

№ варіанта	U, кВ	W, кДж	R _{max} , Ом	L _{max} , мкГн
1	2	3	4	5
1	3	2	2	0,5
2	10	2	2	1,0
3	20	3	2	0,5
4	50	3	2	1,0
5	3	4	4	0,5
6	10	4	4	1,0
7	20	5	4	1,0
8	50	5	4	1,5
9	3	6	5	1,5
10	10	6	5	0,5
11	20	7	5	1,0

Закінчення таблиці 7.2

1	2	3	4	5
12	50	7	5	1,5
13	3	8	3	0,5
14	10	8	3	1,0
15	20	9	3	1,0
16	50	9	3	0,5

Список літератури

1. Колишко Г.М. Основные принципы построения системы защиты в аварийных режимах при работе емкостных накопителей энергии / Г.М. Колишко : тезисы докладов расширенного заседания секции IV научного совета АН СССР на тему : "Емкостные накопители энергии в электрофизических установках предельных параметров". – Харьков : ХПИ, 1981. – С. 5 – 6.

2. Колишко Г.М. Анализ схем защиты мощных магнитно-импульсных установок с использованием резисторов на стадии заряда / Г.М. Колишко, В.В. Конотоп // Вестник Харьковского политехнического института. Тематический выпуск : Магнитно-импульсная обработка металлов. – Харьков : Вища школа. – 1977. – №4. – С. 66 – 71.

3. Резисторы постоянные непроволочные ТВО, С4-2. Технические условия. ОЖО.467.121 ТУ.

4. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры / Р.Х. Бальян, Н.А. Барканов, А.В. Борисов и др. ; под ред. Р.Г. Варламова. – М. : Сов. радио, 1972. – 856 с.

5. Калантаров И.Л. Расчет индуктивностей : Справочная книга / И.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

6. Немцов М.В. Справочник по расчету катушек индуктивности / М.В. Немцов – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
7. Смирнов С.М. Генераторы импульсов напряжения / С.М. Смирнов, П.В. Терентьев. – М. : Энергия, 1964. – 239 с.
8. ГОСТ 2825-67. Резисторы постоянные. Ряды номинальных сопротивлений. – М. : Издательство стандартов, 1973. – 4 с.
9. Татур Т.А. Основы теории электрических цепей (справочное пособие) : учеб. пособие / Т.А. Татур. – М. : Высш. школа, 1980. – 271 с.
10. Коттингхэм М. Excel 2000: руководство разработчика / М. Коттингхэм : пер. с англ. – К. : Издательская группа BVH, 2000. – 704 с.
11. Материалы в машиностроении. Выбор и применение: справочник : в 5 т. ; под общ. ред. И.В. Кудрявцева. Т. 3. Специальные стали и сплавы ; под ред. Ф.Ф. Химушина. – М. : Машиностроение, 1968. – 448 с.
12. Петков А.А. Усовершенствование разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с учетом критериев их надежности : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.13 "Техника сильных электрических и магнитных полей" / А.А. Петков. – Харьков, 2004. – 205 с.
13. Баранов М. И. Предельные характеристики по рассеиваемой импульсной мощности и энергии высоковольтных керамических объемных резисторов типа ТВО – 60. / М. И. Баранов, В. А. Бочаров, М. А. Носенко // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт": сб. научн. тр. Тематический выпуск : Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков : НТУ "ХПИ". – №20. – 2007. – С. 45 – 56.
14. Электротехнический справочник. Т. 1 ; под общей редакцией П.Г. Грудинского. – М. : Энергия, 1974. – 776 с.

Короткий термінологічний словник

Адіабатичний процес – термодинамічний процес (в окремому випадку процес виділення тепла), що відбувається в системі без теплообміну із зовнішніми тілами.

Індуктивність взаємна – відношення потоку взаємної індукції одного із двох контурів до сили струму в іншому контурі, який обумовлює цей потік.

Індуктивність власна – відношення потоку самоіндукції контуру до струму в ньому.

Густина речовини – маса одиничного об'єму.

Резистор – електро- і радіотехнічний елемент, що проявляє при протіканні електричного струму переважно властивість активного опору.

Соленоїд – циліндрична котушка, що складається з великої кількості витків дроту, які утворюють гвинтову лінію.

Опір активний – властивість провідника обмежувати величину струму після прикладання до нього напруги, обумовлена фізичними й геометричними характеристиками провідника.

Опір омичний – див. опір активний.

Опір електричний питомий – опір однорідного провідника довжиною 1 м і площею поперечного перерізу 1 м².

Теплоємність – кількість теплоти, яку необхідно передати тілу для нагрівання на один кельвін.

Теплоємність питома середня – кількість теплоти, яку необхідно підвести для нагрівання одиниці маси тіла на один кельвін.

Електрична міцність резистора – властивість резистора витримувати без пробоя усередині й по поверхні напругу, що прикладається до нього.

Використання електронних таблиць Excel для розрахунків захисних резисторів

У цьому додатку розглянуті основні прийоми проведення обчислень за співвідношенням, які застосовуються для розрахунків захисних резисторів, а також використовувані при цьому вбудовані функції.


При цьому передбачається, що користувачі знайомі з основами роботи в програмному середовищі Excel [10]:

- уведення тексту й чисел у комірки;
- форматування вмісту комірки;
- проведення елементарних арифметичних обчислень.

При обчисленні індуктивності захисних резисторів необхідно використовувати ряд вбудованих в Excel функцій. Їхнє введення здійснюється за допомогою **Мастера функцій**. Для цього необхідно вибрати необхідну комірку (або позицію у вмісті комірки) і натиснути кнопку f_x на панелі інструментів. У результаті на екрані з'явиться діалогове вікно **Мастера функцій**, варіант якого показаний на рис. Д.2.1. Використовуючи це вікно, можна вибрати необхідну функцію.

При розрахунках захисних резисторів часто використовується число $\pi = 3,1415\dots$. В Excel є функція **ПИ()**, що повертає значення цього числа з великою кількістю значущих цифр. Після вибору цієї функції з'являється діалогове вікно, показане на рис. Д.2.2. Слід зазначити, що ця функція не має аргументів.

Функції обчислення квадратного кореня **КОРЕНЬ(число)**, і натурального логарифма **LN(число)**, діалогові вікна яких показані на рис. Д.2.3 і Д.2.4, мають по одному аргументу, що розміщуються в полі "**число**". У поле можуть бути введені числа, посилання на комірки й інші функції.

Праворуч від поля "число" розташована кнопка , яка дозволяє згорнути вікно до розмірів поля, що забезпечує зручність вибору інформації і її введення в поле.

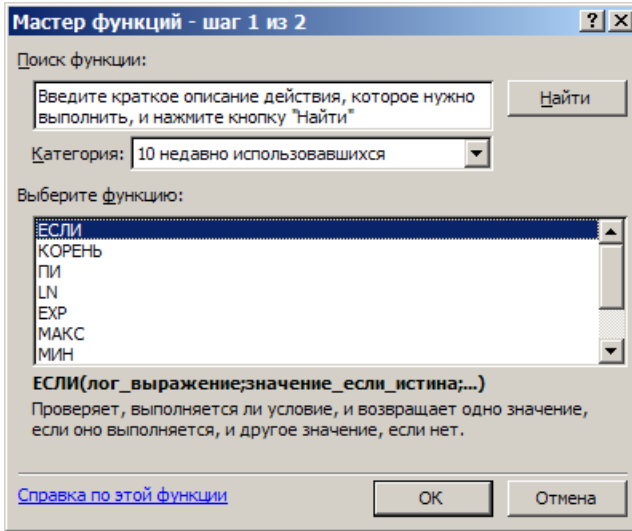


Рисунок Д.2.1 – Діалогове вікно **Мастера функций**

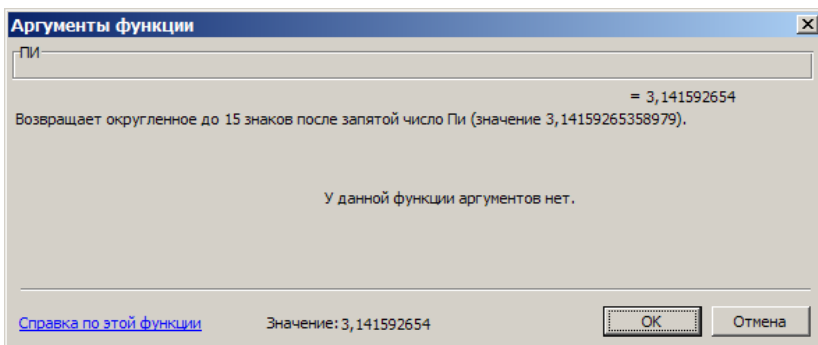


Рисунок Д.2.2 – Діалогове вікно функції **ПИ()**

На рис. Д.2.3 показаний приклад обчислення кореня квадратного із суми вмісту двох комірок **A3+B5**.

На рис. Д.2.4 показаний приклад обчислення натурального логарифма квадрата вмісту комірки **A5**, помноженого на число π з додаванням вмісту комірки **A51**.

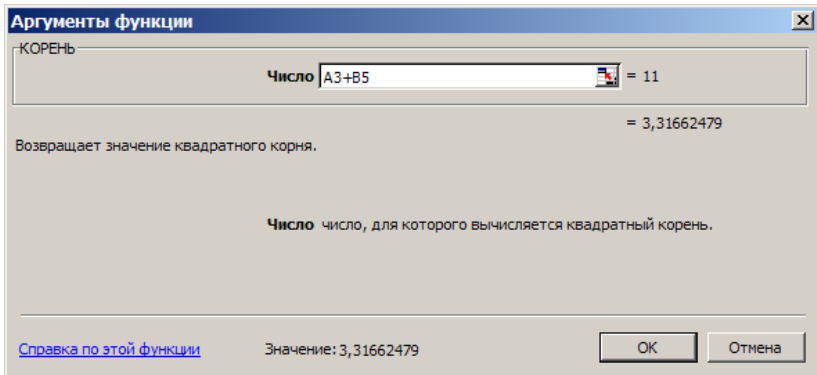


Рисунок Д.2.3 – Діалогове вікно функції **КОРЕНЬ(число)**

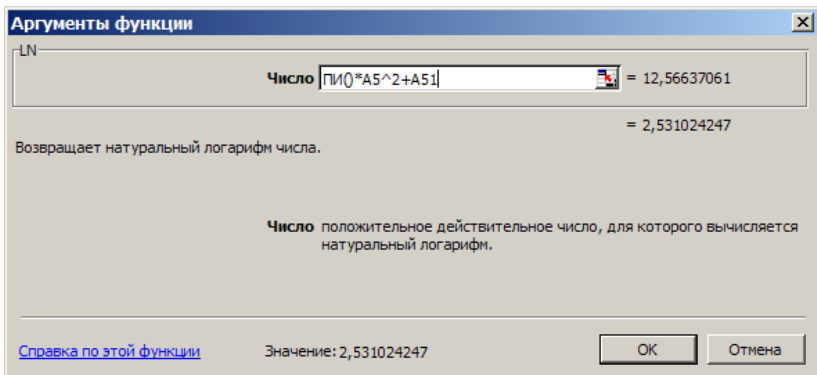


Рисунок Д.2.4 – Діалогове вікно функції **LN()**

Для вибору варіанта обчислення за заданою умовою використовується функція **ЕСЛИ(лог_выражение; значение_если_истина; значение_если_ложь)**, діалогове вікно якої показано на рис. Д.2.5. У позицію "лог_выражение" вводиться умова вибору. У прикладі умовою вибору є позитивність добутку вмісту комірок **A3** і **A4**.

У позицію "значение_если_истина" вводиться рядок, що визначає значення, яке повертається функцією при виконанні логічної умови. У прикладі – сума вмісту комірок **A3+A4**. У позицію "значение_если_ложь" – рядок, що визначає значення, яке повертається функцією при невиконанні логічної умови. У прикладі – вміст комірки **C5**.

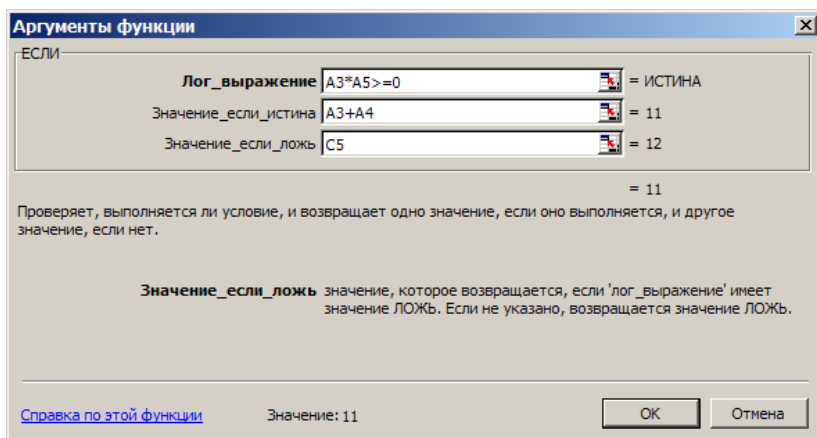


Рисунок Д.2.5 – Діалогове вікно функції **ЕСЛИ()**

Вміст комірки (у тому числі й уведені формули) можна подивитися в **строке формул**, виділивши відповідну комірку. Якщо необхідно переглянути вміст усіх комірок **Листа**, то треба набрати, починаючи з основного меню **Сервис / Параметры / закладка Вид**, і

встановити прапорець у позиції **формулы**, як показано на рис. Д.2.6. Повернення у початковий стан здійснюється зняттям прапорця.

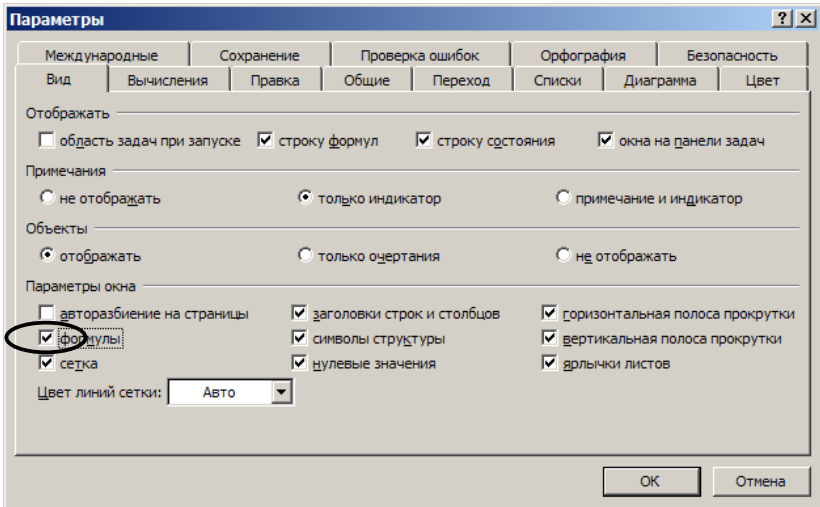
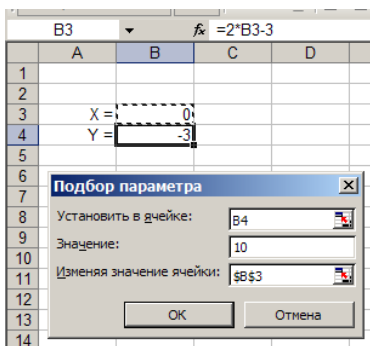


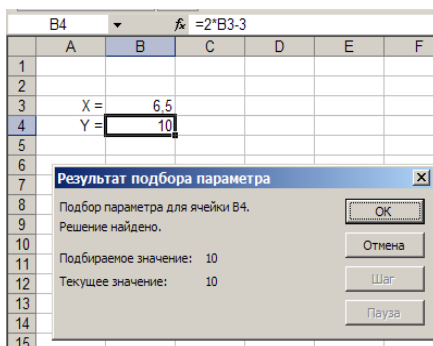
Рисунок Д.2.6 – Вигляд діалогового вікна **Параметры**

При розрахунках захисних резисторів зручно використовувати процедуру **Подбор параметра**. Для її активізації необхідно набрати, починаючи з основного меню **Сервис / Подбор параметра** На рис. Д.2.7 показано приклад підбору значення X у рівнянні $Y = 2X - 3$, при якому Y приймає значення, що дорівнює 10. На рис. Д.2.7 а показано початковий стан до виконання процедури, на рис. Д.2.7 б – після її виконання.

Продовження додатка 2



a



б

Рисунок Д.2.7 – Приклад підбору параметрів

Додаток 3

Характеристики провідникових матеріалів з високим омичним опором

При виготовленні захисних резисторів використовують дві групи провідникових матеріалів з високим омичним опором. До першої групи належать сплави для електронагрівників (представник – ніхром), до другої – для елементів опорів і реостатів (манганін, константан). Фізичні характеристики сплавів наведені в табл. Д.3.1.

Таблиця Д.3.1 – Фізичні характеристики сплавів з високим омичним опором [11]

Найменування, марка матеріалу	Питомий електричний опір, Ом·м	Питома теплоємність, кДж / (кг·К)	Щільність, кг / м ³
Константан			
МНМц 40-1,5	$0,45 \cdot 10^{-6} - 0,52 \cdot 10^{-6}$	0,409	$8,9 \cdot 10^3$
Манганін			
МНМц 3-12	$0,47 \cdot 10^{-6} - 0,48 \cdot 10^{-6}$	0,408	$8,4 \cdot 10^3$
Ніхром			
X15Н60	$1,06 \cdot 10^{-6} - 1,17 \cdot 10^{-6}$	0,461	$8,2 \cdot 10^3$
X20Н80	$1,02 \cdot 10^{-6} - 1,17 \cdot 10^{-6}$	0,419	$8,4 \cdot 10^3$

Основними властивостями матеріалів першої групи є: висока жаростійкість, високий електричний опір, достатня крипостійкість (забезпечує збереження геометрії нагрівачів), задовільна пластичність у холодному стані (забезпечує можливість виготовлення нагрівачів).

Основними властивостями матеріалів другої групи є: високий електроопір, мала величина температурного коефіцієнта електроопору, незмінюваність електричних властивостей у часі.

Ряди діаметрів проволочи з високим омичним опором наведені в табл. Д.3.2.

Таблиця Д.3.2 – Ряд діаметрів дроту [11]

Найменування матеріалу	Діаметр, мм
Константан	0,1; 0,12; 0,14; 0,15; 0,16; 0,18; 0,2; 0,22; 0,25; 0,28; 0,3; 0,33; 0,35; 0,38; 0,4; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; від 1,00 до 2,00 через 0,1; 2,25; 2,50; 2,75; 3,00; 3,50; 4,00; 4,5; 5,00
Манганін	0,1; 0,12; 0,14; 0,15; 0,16; 0,18; 0,2; 0,22; 0,25; 0,28; 0,3; 0,35; 0,36; 0,38; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,56; 0,60; 0,63; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; від 1,00 до 2,00 через 0,1; 2,00; 2,20; 2,50; 3,00; 3,60; 4,00; 4,50; 5,00; 6,00
Ніхром	0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,2; 0,22; 0,25; 0,28; 0,30; 0,32; 0,40; 0,45; 0,50; 0,56; 0,60; 0,63; 0,70; 0,80; 0,90; 1,00; 1,10; 1,20; 1,40; 1,60; 1,80; 2,00; 2,20; 2,50; 2,80; 3,00; 3,20; 3,60; 4,00; 4,50; 5,00; 5,60; 6,00; 6,30; 7,00; 8,00; 9,00; 10,00

Додаток 4

Основні характеристики резисторів типу ТВО

Таблиця Д.4.1 – Масогабаритні характеристики

Тип резистора	Довжина / з урахуванням виводів, мм	Розміри поперечного перерізу, мм × мм	Маса, г
ТВО-5	77/ 130	11,5 × 9,5	30
ТВО-10	112 / 165	15 × 10,5	60
ТВО-20	112 / 165	22,5 × 19,5	155
ТВО-60	186/ 220 ^{*)}	47 × 28	не більше 790

Примітка. * – у стані поставки в резисторів ТВО-60 виводи розташовані перпендикулярно поздовжньої осі.

Таблиця Д.4.2 – Основні технічні характеристики

Тип резистора	Межі номінальної величини опорів	Постійна і змінна напруга, В	Імпульсна напруга, В
ТВО-5	27 Ом – 1 МОм	1500	5000
ТВО-10		3000	10000
ТВО-20	24 Ом – 1 МОм	1400	9000
ТВО-60		2450	25000

Проміжні значення номінального опору резисторів утворюються множенням коефіцієнтів ряду E24 (див. табл. Д.4.3) на 10^n . Наприклад, використовуючи коефіцієнти 3,9; 5,6; 9,1; 1,3; 6,2; 1, можна одержати такі значення номінального опору: $3,9 \cdot 10^1 = 39 \text{ Ом}$; $5,6 \cdot 10^2 = 560 \text{ Ом}$; $9,1 \cdot 10^3 = 9,1 \text{ кОм}$; $1,3 \cdot 10^4 = 13 \text{ кОм}$; $6,2 \cdot 10^5 = 620 \text{ кОм}$; $1 \cdot 10^6 = 1 \text{ МОм}$.

Таблиця Д.4.3 – Номінальні опори по ряду E24

Індекс ряду	Коефіцієнти ряду					
E24	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8
	1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2
	1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1

Згідно з [3] резистори повинні витримувати вплив імпульсного навантаження з параметрами:

- тривалість імпульсу від 1 до 50 мкс;
- коефіцієнт перевантаження по потужності не більше 1000;
- період повторення імпульсів не менше 50 мкс

при середній потужності й імпульсній напрузі не вище граничних значень.

Результати випробувань резисторів типу ТВО-10-27 Ом, наведені в [12], показують, що при адіабатичному поглинанні енергії резистори надійно працюють у таких режимах. При енергії імпульсу $W = 800$ Дж допускається імпульсна напруга $U = 4$ кВ і середня розсіювана потужність $P_{cp} = 6,7$ Вт, а при енергії імпульсу $W = 600$ Дж, допустима імпульсна напруга становить $U = 10$ кВ та середня розсіювана потужність $P_{cp} = 7,7$ Вт.

Для резисторів ТВО-60-24 Ом допустима енергія, що поглинається в адіабатичному режимі, може бути оцінена за даними, наведеними в [13], як $W = 1800$ Дж при допустимій імпульсній напрузі $U = 25$ кВ і середній розсіюваній потужності $P_{cp} = 60$ Вт.

Вказані величини енергії W справедливі при напрацюванні резисторів до $1 \cdot 10^4$ імпульсів.

Додаток 5

Властивості ізоляційних матеріалів

Таблиця Д.5.1 - Розміри мотаних електроізоляційних виробів [14]

Класифікація на основі	Найменування виробу	Основні розміри, мм		
		внутрішній діаметр	проміжні значення внутрішнього діаметра (кратні)	найменша товщина стінки
Паперово-бакелітові	Трубки	10–30	2 або 5	1,5
		32–80	2 або 5	1,5
	Циліндри	85–150	5	2
		155–250	5	2
		255–350	5	2,5
Текстолітові на бакелітовому зв'язуючому	Трубки	5–30	через 1 мм	1,5
	Циліндри	32–75	2 або 5	5
		76–125	2 або 5	6
		126–500	2 або 5	7
Склотекстолітові на епоксидному зв'язуючому	Трубки	10–20	2 або 5	2–5
		22–80	2 або 5	2–10
	Циліндри	85–400	5	3–20

Нагрівостійкість паперово-бакелітових і текстолітових виробів становить 105 °С, склотекстолітових на епоксидному зв'язуючому – 155 °С [14].

Додаток 6

Приклади виконання резисторів

На рис. Д.6.1 показаний ескіз загального вигляду дровового резистора зі звичайним намотуванням у гвинтовий паз. Поверхня резистора покрита лаковим шаром.

Блок резисторів ТВО-60, показаний на рис. Д.6.2, зібраний на одній стороні ізоляційної панелі, що прикріплюється до конструкції високовольтного пристрою за допомогою болтового з'єднання через отвори $\varnothing 10,5$ мм. Блок підключається до розрядного кола в місцях приєднання перемичок.

На рис. Д.6.3 показаний блок резисторів ТВО-60 з регульованим опором. Резистори кріпляться до ізоляційної панелі з двох сторін. У місцях кріплення є цангові з'єднувачі, у які вставляються знімні перемички. Струмопідвід здійснюється до верхніх резисторів. Блок закріплюється на підставці конструкції високовольтного пристрою за допомогою кутиків і болтового з'єднання.

На рис. Д.6.4 показаний загальний вигляд батареї накопичувальних конденсаторів, які захищаються блоком резисторів ТВО-10, конструктивно виконаним у вигляді циліндра.

Блоки захисних резисторів, показані на рис. Д.6.5, виконані у відкритому виконанні.

Захист конденсаторів одиничними захисними резисторами показаний на рис. Д.6.6.

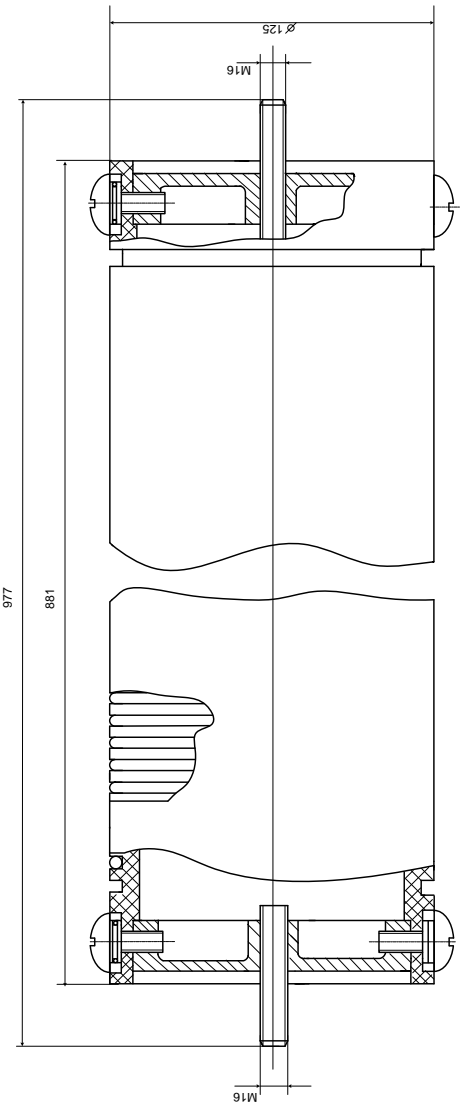


Рисунок Д.6.1 – Дротяний резистор

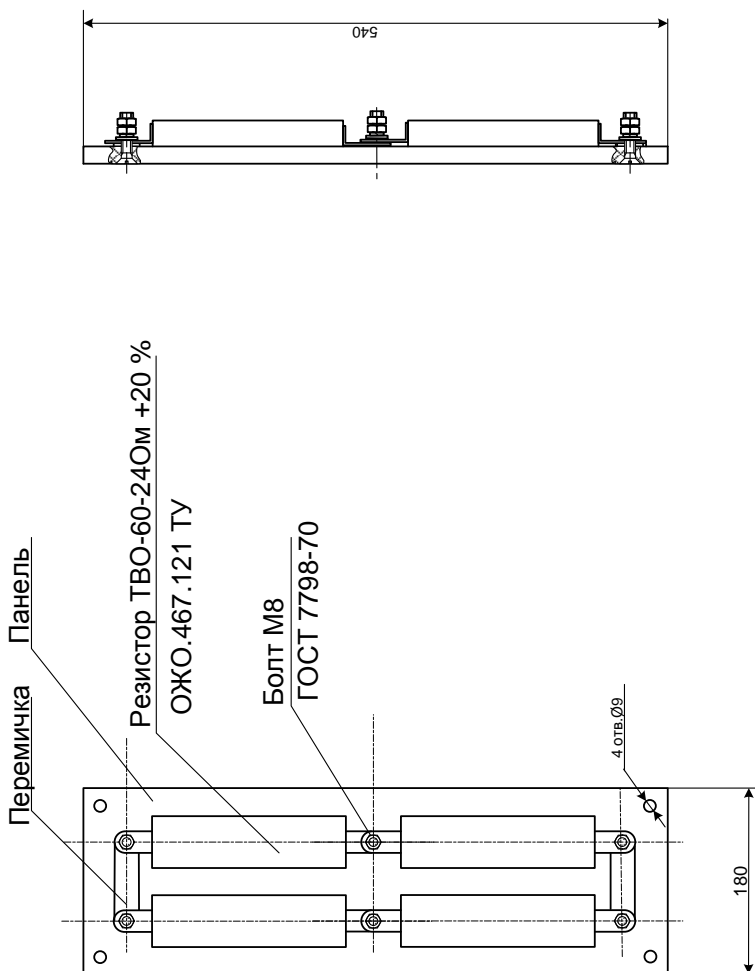


Рисунок Д.6.2 – Блок резисторів ТВО-60

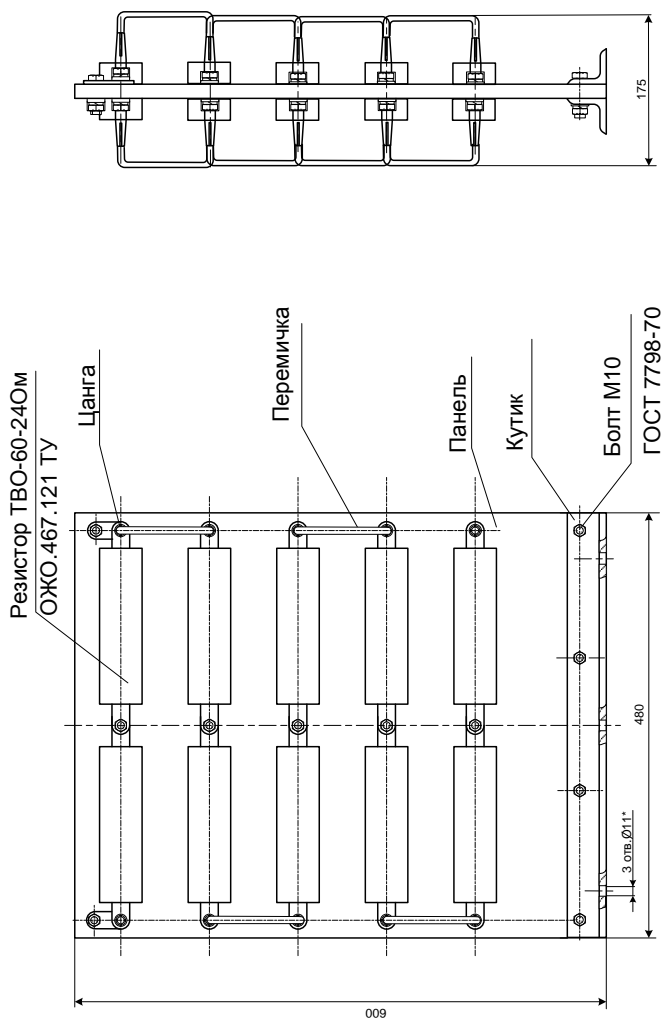


Рисунок Д.6.3 – Блок резисторів ТВО-60 регульований

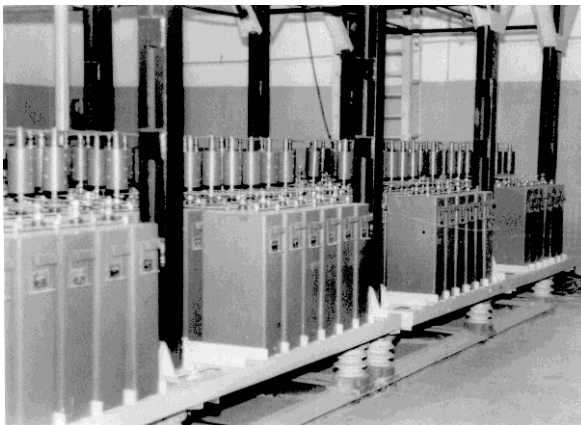


Рисунок Д.6.4 – Загальний вигляд батареї накопичувальних конденсаторів із блоком захисних резисторів у циліндричному корпусі

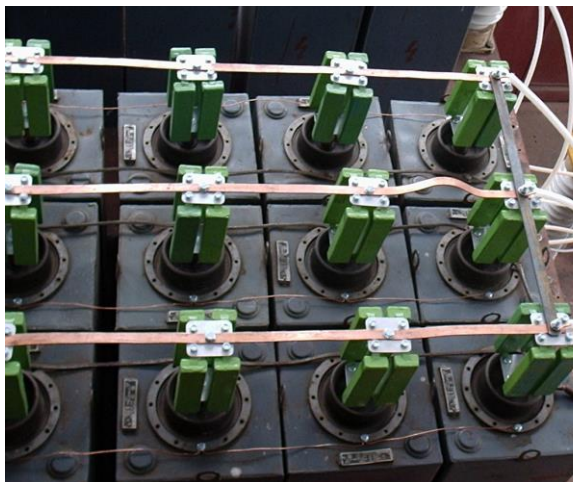


Рисунок Д.6.5 – Загальний вигляд батареї накопичувальних конденсаторів із захисними резисторами типу ТВО-60



Рисунок Д.6.6 – Загальний вигляд батареї накопичувальних конденсаторів з одиничними захисними резисторами типу ТВО-60

Зміст

Вступ	3
1. Основні схеми захисту конденсаторів ємнісних накопичувачів енергії на стадії заряду з використанням захисних резисторів	5
1.1. Схема захисту конденсаторів з резистором, включеним у коло розряду ЄНЕ на навантаження	5
1.2. Кільцева схема захисту	9
1.3. Основні вимоги до захисних резисторів	11
2. Типи елементів, використовувані як захисні резистори	11
3. Розрахунок параметрів резисторів із дроту з високим омичним опором	20
3.1. Розрахунок активного опору	20
3.2. Розрахунок індуктивності	21
3.3. Розрахунок теплового режиму	24
3.4. Електрична міцність	25
4. Блоки захисних резисторів на базі резисторів ТВО	26
5. Розрахунок параметрів захисних резисторів	31
5.1. Загальні вимоги	31
5.2. Розрахунок дротяних резисторів	31
5.3. Приклад розрахунку дротяного резистора	32
5.4. Розрахунок блока резисторів ТВО	38
5.5. Приклад розрахунку блока резисторів	40
Контрольні запитання	42
Контрольні завдання	43
Список літератури	45
Додаток 1. Короткий термінологічний словник	47
Додаток 2. Використання електронних таблиць Excel для розрахунків захисних резисторів	48

Навчальне видання

ПЕТКОВ Олександр Олександрович

**Розрахунок і проектування захисних резисторів
ємнісних накопичувачів енергії**

Навчально-методичний посібник
з курсу "Розробка електрофізичних установок для випробувань
та досліджень"
для студентів електротехнічних та електроенергетичних
спеціальностей

Відповідальний за випуск В. В. Рудаков

Роботу до видання рекомендував проф. С.М. Григоров

Редактор Л.А. Пустовойтова

План 2009 р., поз. 49/106-09

Підп. до друку 07.09.09. Формат 60х84 $\frac{1}{16}$. Папір офсетний.
Друк - ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,0
Обл.-вид. арк. 2,75. Наклад 50 прим. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ "ХПІ".

Свідectво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Друкарня НТУ "ХПІ".
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

